心理科学进展 2020, Vol. 28, No. 9, 1493–1507
Advances in Psychological Science

https://dx.doi.org/10.3724/SP.J.1042.2020.01493

睡眠限制对认知功能的影响及其潜在作用机制*

钱 柳[1,2] 汝涛涛[2,3] 罗 雪[1] 牛佳兴[1] 马永骏[1] 周国富[2,3]

([1]华南师范大学心理学院，光与身心健康实验室，广州 510631)
([2]华南师范大学，国家绿色光电子国际联合研究中心，广州 510006)
([3]华南师范大学，华南先进光电子研究院，广东省光信息材料与技术重点实验室&
彩色动态电子纸显示技术研究所，广州 510006)

摘 要 睡眠限制已然成为现代社会人们普遍面临的问题，其对个体身心机能的影响备受研究者关注。众多研究表明，睡眠限制会对注意功能、执行功能和长时记忆等不同认知领域的心理加工产生差异化影响，且影响程度与任务类型、睡眠限制的严重程度、年龄和性别等因素相关。研究者们提出了 4 种主要的作用假说：唤醒假说、注意控制假说、警觉性假说以及前额皮层易感性假说。未来研究需要从关注个体间差异、使用动脉自旋标记灌注功能磁共振成像技术以及重视轻度睡眠限制的影响等角度进行深化和扩展。

关键词 睡眠限制；认知功能；任务类型；个体差异；潜在机制
分类号 B845

睡眠是个体生命必需的生理过程，其不仅可以恢复日间消耗殆尽的精力水平，同时对维持个体身体健康和正常心理功能也发挥着举足轻重的作用。然而，在实际生活中，由于工作和学习等原因，个体的睡眠可能无法达到维持身心健康所需的基本时长[如儿童 9~11 小时；青少年 8~11 小时；成年人 7~9 小时；老年人 7~8 小时(Hirshkowitz et al., 2015)]，即存在睡眠不足的现象，亦称睡眠限制。根据被缩短睡眠的时长，睡眠限制可划分为轻度(缩短时长小于 1.58 小时)、中度(1.59~5.07 小时)和重度(5.08 小时以上或完全睡眠剥夺)睡眠限制(Lowe, Safati, & Hall, 2017)。已有大量研究发现，睡眠不足不仅增加罹患心血管疾病和肥胖症等风险(St-Onge & Zuraikat, 2019; Yu, Lu, Jia, Liu, & Cheng, 2019)，也会对个体广泛的认知功能产生负面影响，如注意功能、执行功能和情绪管理等(Cunningham, Jones, Eskes, & Rusak, 2018; Lo, Ong, Leong, Gooley, & Chee, 2016)。与此同时，受损的认知功能进而导致工作效率下降，甚至增加生产或交通安全事故的风险(Lahti, Sysi-Aho, Haukka, & Partonen, 2011; Saadat et al., 2016; van der Heijden et al., 2018)。

目前，睡眠限制的情况较为普遍。美国国家睡眠基金会(National Sleep Foundation)在 2019 年的睡眠调查中发现，只有 41%的青少年认为自己的睡眠情况较好；而睡眠情况越差，人们的身心健康和行为表现受其影响越大。同样地，我国睡眠不足的情况也较为严峻。《2019 年中国睡眠指数报告》指出，在工作日期间，可以保证 7~8 小时睡眠时长的人群比例只有 51.6%。另外，《中国青少年儿童睡眠健康白皮书》也表明，中学生平均睡眠时长只有 6.82 个小时，而且夜晚睡眠时长不足 7 小时的中学生占 59.4%。因此，由于睡眠限制的普遍性以及其引发后果的严重性，厘清睡眠限制对个体认知功能的影响及其潜在作用机理具有极其重要的理论和社会意义。目前，虽有很多研究证明了睡眠限制对心理认知功能会产生不利的

收稿日期：2019-10-14
* 全国教育科学规划教育部青年课题(EBA190467)、国家重点研发计划项目(2016YFB0401202)、广东省光信息材料与技术重点实验室(2017B030301007)、广州市哲学社科规划 2019 年度羊城青年学人课题(2019GZQN19)、国家高等学校学科创新引智计划 111 引智基地项目和广州市科技计划(2019050001)的资助。
通信作者：汝涛涛, E-mail: taotao.ru@scnu.edu.cn;
周国富, E-mail: guofu.zhou@m.scnu.edu.cn

影响，但研究结果并不十分一致。从睡眠限制的作用机制层面考虑，这可能是个体唤醒程度、注意控制水平、警觉性或前额皮层易感性不同的缘故；从影响因素层面考虑，这可能与研究中使用的认知任务特点、睡眠限制的严重程度以及被试个体特征等方面的差异有关。因此，本文将从睡眠限制对不同认知领域心理加工的影响、影响睡眠限制作用的因素及其潜在的作用机理出发，对前人的文献进行梳理总结，并在此基础上提出未来研究可能开展的方向。

1 睡眠限制对认知功能的影响

人们的日常行为通常依赖某一种或多种心理认知功能的参与。研究者们对睡眠限制与认知功能的关系进行了广泛的探索，其中较受关注的认知功能包括注意功能、执行功能和长时记忆等认知领域。

1.1 注意功能

注意功能泛指将资源集中于一个刺激或其特定方面，或在各种刺激之间分配注意资源的过程(Petersen & Posner, 2012)，通常包括简单的持续性注意以及较为复杂的选择性注意和分配注意。

1.1.1 简单注意加工

持续性注意(或警觉性注意)因其刺激与反应的单一性，是一种较为简单的注意加工，加工过程不涉及其他注意(如选择性注意)或执行控制成分(Oken, Salinsky, & Elsas, 2006)。研究者们通常选用心理运动警觉性测试(Psychomotor Vigilance Test) (Dinges & Powell, 1985)、简单反应时任务(Simple Reaction Time Task)、线索反应时任务(Cued Reaction Time Task)和戈登警觉性任务(Gordon Vigilance Task)等来测量。在上述任务范式中，心理运动警觉性任务对于持续性注意功能的探测更为敏感，且较少受练习效应影响，因此其作为测量简单注意功能的经典任务而被广泛使用。

现有研究结果大多提示，简单注意加工任务(测量持续性注意的任务)更容易受到睡眠限制的影响。例如，Goel, Abe, Braun 和 Dinges (2014)要求被试接受连续 5 晚睡眠 4 小时的睡眠限制条件或连续 5 晚睡眠 8 小时的控制条件，并完成简单的心理运动警觉性任务和较复杂的认知任务(包括数字加减运算任务、数字广度任务和风险监测任务等)。结果发现，在各复杂任务成绩上，睡眠限制与控制条件之间没有显著差异；而在完成心理运动警觉性任务时，睡眠限制条件下被试的任务表现显著变差，且随着睡眠限制天数的增加而持续下降。Sadeh, Gruber 和 Raviv (2003)使用简单反应时任务和其他复杂认知任务也发现，睡眠限制对持续性注意功能的影响较大，而对其他复杂认知任务，如手指敲击任务(运动速度功能)和数字广度测试(工作记忆功能)等影响较小。同样地，有研究发现，与非睡眠限制条件相比，在睡眠限制条件下，被试完成简单反应时任务的反应时显著增加；在线索反应时任务中，无效线索的反应时显著增加(Versace, Cavallero, de Min Tona, Mozzato, & Stegagno, 2006)。但也有少量研究并未发现睡眠限制对持续性注意功能的显著影响。例如，当 11~13 岁儿童的夜晚睡眠时长为 4 小时时，其第二天的心理运动警觉性任务表现没有显著下降(Carskadon, Harvey, & Dement, 1981)。另一项关于儿童(8~15 岁)睡眠限制的研究也发现，与充足的睡眠时长条件相比，4 小时的睡眠限制对持续性注意功能没有产生显著影响(Fallone, Acebo, Arnedt, Seifer, & Carskadon, 2001)。以上关于睡眠限制对持续性注意功能影响的研究存在不一致结果，这可能与研究中睡眠限制人群的年龄差异有关。此外，不少元分析研究统合以往睡眠限制与认知功能关系的研究结果表明，相比于其他复杂认知加工任务(如工作记忆和冲突监测任务等)，持续性注意任务更易受到睡眠限制影响(Lim & Dinges, 2010; Lowe et al., 2017)。

1.1.2 复杂注意

复杂注意包括选择性注意和分散注意。常用测量包括分配注意任务(Divided Attention Task)、视觉追寻任务(Visual Pursuit Task)、追寻跟踪任务(Pursuit Tracking Task)和注意力表现测试(Test for Attention Performance)等，这些任务加工无需工作记忆或行为抑制成分的参与(Petersen & Posner, 2012)。

不少研究发现，睡眠限制对复杂注意任务的影响较为显著，并可能与任务类型和年龄等因素相关。例如，Stenuit 和 Kerkhofs (2008)使用注意力表现测试、记忆任务、数字加法任务和抽象任务等探究连续 3 晚 4 小时的睡眠时长对青年和老年女性的认知功能的影响，结果发现，注意力表现测试的成绩受到睡眠限制的显著干扰，表现为反

应时明显变长, 但较为复杂的记忆任务、如数字加法任务和抽象任务的成绩均未受影响; 而且与老年女性相比, 青年女性的任务表现更易受到睡眠限制的影响。另外, 研究发现, 在复杂注意功能上存在睡眠限制时长的剂量效应。例如, 有研究者要求被试分别接受 0 小时、2 小时、4 小时和 8 小时的睡眠条件, 并使用分配注意力任务考察其在清醒阶段中认知功能的变化, 结果发现, 被试的睡眠时长越短, 其分配注意力任务的表现越差(Roehrs, Burduvali, Bonahoom, Drake, & Roth, 2003)。与此同时, 认知神经科学的研究结果表明, 睡眠限制不仅会降低个体的行为绩效, 也会对其大脑神经活动产生显著影响。例如, Poudel, Innes 和 Jones (2013)使用二维追寻跟踪任务发现, 与非睡眠限制条件相比, 睡眠限制会显著干扰被试的任务表现, 主要表现为集中于物体追踪的时长明显减少, 并出现更多追踪错误; 同时, 睡眠限制会显著降低任务加工相关脑区(如枕下回、顶内皮层和初级运动皮层)的血氧活动水平。

1.2　执行功能

执行功能包括了认知加工的很多方面, 涵盖了复杂的目标导向行为的计划、启动、排序和监控等多种高级认知过程(Miyake & Friedman, 2012; Miyake et al., 2000)。执行功能包括工作记忆(在短时间内对任务相关信息进行短暂地监控、加工和调控)、行为抑制(有意识地抑制优势、主导或自动反应)和任务转换(在不同任务或不同反应规则之间灵活转换)三种成分(Miyake et al., 2000)。测量执行功能的任务既包括单一成分的测试, 如工作记忆任务和行为抑制任务, 也包括涉及多个成分的复杂执行功能任务。

1.2.1　工作记忆

测量工作记忆的认知任务包括向前回忆任务(N-back Task)、序列加减任务(Serial Addition/Subtraction Task)、词语工作记忆任务(Verbal Working Memory Task)和数字广度任务(Digit Span Task)等。

在探究青少年和青年被试对睡眠限制耐受性的研究中, Jiang 等人(2011)首先要求两组被试连续 5 天睡眠 6 小时, 之后完成工作记忆测试(包括简单和复杂两种版本的词语记忆与算术工作记忆)。结果发现, 睡眠限制对青年被试的工作记忆任务表现没有显著影响; 而虽然青少年被试完成词语与算数工作记忆任务的正确率也未受影响, 但他们完成简单的词语工作记忆和算术工作记忆任务的反应时显著增加。类似地, 有研究使用向前回忆任务研究青少年被试连续 7 天睡眠 5 小时的工作记忆表现的变化, 结果发现, 与睡眠基线(睡眠 9 小时)相比, 连续 3 晚的睡眠限制对青少年被试完成向前回忆任务的影响并不明显, 直至第 4 晚的睡眠限制之后, 工作记忆任务表现出现显著降低(Lo, Ong et al., 2016)。这些研究结果表明, 睡眠限制对工作记忆功能的影响较不一致, 可能与年龄或睡眠限制严重程度(持续天数或限制时长)等因素有关: 主要表现为, 相较于青年而言, 睡眠限制对青少年工作记忆的影响较大, 如反应时显著增加, 而且影响程度会随着睡眠限制天数增多而增大。另外, 睡眠限制对工作记忆的影响在生理层面上也有所体现。例如, Miyata 等人(2015)将被试连续 3 晚的睡眠时长限制为 4 小时, 并要求他们在每晚睡眠结束后完成单词流畅性任务, 同时在完成任务过程中使用近红外光学成像技术测量被试大脑皮层的氧合血红蛋白水平。结果发现, 与睡眠充足的条件相比, 睡眠限制后被试完成单词流畅性任务的反应时显著变长, 同时被试大脑皮层的氧合血红蛋白的峰值水平显著变低。

1.2.2　反应抑制

测量抑制功能所使用的认知任务主要是反应/不反应任务(Go/No-go Task), 也有研究使用斯特鲁普任务(Stroop Task)和持续表现任务(Continuous Performance Task)等。

已有元分析研究结果表明, 除了持续性注意外, 睡眠限制对行为抑制功能也会产生较为显著的负性影响(Lowe et al., 2017)。例如, Demos 等人(2016)要求中年被试连续 4 晚睡眠 6 小时, 接着再连续 4 晚睡眠 9 小时, 在这 4 晚睡眠限制和 4 晚正常睡眠后均完成反应/不反应任务、冲动性决策和即时/延迟奖励等认知任务。结果发现, 在睡眠限制条件下, 被试在完成反应抑制任务时会出现更多的错误, 且平时睡眠时长较长的被试受睡眠限制的影响更严重; 而在冲动性决策和即时/延迟奖励任务上, 被试在睡眠限制和睡眠充足两种条件下的表现没有显著差异。部分研究者使用斯特鲁普任务也发现了睡眠限制对反应抑制功能的负性影响(Cohen-Zion et al., 2016; Jarraya et al., 2014)。虽然, 不少研究发现了睡眠限制对反应抑制的负面影响, 但是也有研究者发现了不一致的

结果。例如, Vermeulen 等人(2016)的一项田野研究对儿童的睡眠时长与认知功能的关系进行了考察, 他们根据儿童的睡眠时长划分了长睡眠时长(睡眠充足)组与短睡眠时长(睡眠不足)组, 并要求其完成持续性注意任务、反应/不反应任务和视觉数字广度任务, 结果发现, 在持续性注意和反应抑制任务上, 不同睡眠时长组的任务表现没有差异。综合上述结果可知, 年龄可能会影响睡眠限制对反应抑制功能的作用程度: 较之于儿童, 睡眠限制对成年人反应抑制功能的干扰更为显著。猜测可能是由于儿童的大脑还处于发育阶段, 前额皮层功能尚不完善, 对认知任务的监控和完成的参与度较小, 因此儿童受睡眠限制的影响并不显著。

1.2.3 复杂执行功能

测量复杂执行功能的认知任务主要有伦敦塔(Tower of London)、威斯康辛卡片分类任务(Wisconsin Card Sorting Task)和数字符号替换任务(Digit Symbol Substitution Task)等。

已有研究表明, 复杂执行功能主要会受到长期睡眠限制的影响。例如, Miyata 等人(2010)将青年被试的睡眠时长限制为少于 4 小时, 并要求他们完成威斯康辛卡片分类任务、连续表现任务和向前回忆任务, 结果发现, 与充足睡眠条件相比, 睡眠限制对威斯康辛卡片分类任务和向前回忆任务的成绩没有影响。但有研究者发现了睡眠限制对复杂执行功能的剂量效应。他们要求青少年连续 7 晚睡眠 5 小时, 并且每天完成反应/不反应任务、向前回忆任务和数字符号替换任务等认知测试。结果发现, 与睡眠充足条件相比, 睡眠限制第 1 晚后的各种任务测试的成绩无显著差异; 但随着睡眠限制天数的增加, 各任务测试表现逐渐显著变差(Lo, Ong et al., 2016)。同样地, Banks, van Dongen, Maislin 和 Dinges (2010)要求青年被试连续 5 天睡眠 4 小时, 并要求他们每天完成数字符号替换任务等认知任务, 结果发现, 随着睡眠限制天数增多, 数字符号替换任务的正确率逐渐下降。由此提示, 睡眠限制对复杂执行功能的影响可能依赖于较长的睡眠限制周期, 即可能存在限制天数的累积效应。

1.3 长时记忆功能

长时记忆是指在一段较长的时间内对信息进行编码、保持和回忆(Atkinson & Shiffrin, 1968)。该领域主要涉及的是关于陈述性记忆或情景记忆的任务。测量长时记忆一般使用听觉语言学习任务(Auditory Verbal Learning Task)、探测记忆回忆任务(Probed Memory Recall Task)、逻辑记忆回忆任务(Logical Memory Recall Task)和加利福尼亚语言学习测试(California Verbal Learning Test)等。

不少研究探究了睡眠限制对长时记忆功能的影响, 但研究结果并不完全一致。例如, 有研究者考察了睡眠限制对青少年前瞻记忆表现的影响, 他们要求两组被试分别接受连续 5 晚 5 小时的睡眠限制条件和连续 5 晚 9 小时的控制条件, 之后完成前瞻记忆任务。结果发现, 两组被试的前瞻记忆效果没有显著差异(Leong et al., 2017)。相反, Cousins 等人(2018)的研究却发现睡眠限制对长时记忆巩固的显著影响。他们同样要求两组青少年被试接受睡眠限制条件(连续 5 晚 5 小时睡眠)或正常睡眠时长条件(连续 5 晚 9 小时睡眠), 接着完成一个图片编码任务, 并在 3 晚 9 小时恢复睡眠后进行记忆能力测验。结果发现, 与正常睡眠时长组相比, 睡眠限制组的记忆表现更差, 表现为正确率更低, 且反应时更长。造成上述结果不一致的原因可能与研究所采用的记忆任务类型相关。正如有研究者指出, 不同研究之间存在的测试时间差异、记忆任务的类型差异、被试样本差异等都可能会导致不一致的研究结果(Cedernaes et al., 2016)。

通过对睡眠限制和不同认知领域心理加工关系的研究结果进行梳理, 不难发现, 睡眠限制可能会对个体心理功能产生显著干扰, 而干扰程度受到多种因素的制约而不尽相同。因此, 对这些因素的分析或许可以间接地帮助研究者们探明睡眠限制影响心理认知功能的潜在作用机理。

2 影响睡眠限制作用的因素

以往研究结果提示, 睡眠限制对不同认知功能的负性作用程度并不十分一致, 这种作用程度可能会受到诸多因素的影响, 其中主要包括认知任务类型、睡眠限制程度(睡眠限制时长和持续天数)、被试自身的年龄和性别等因素。

2.1 任务类型

睡眠限制对认知功能的作用会受到不同任务类型的影响。具体表现为: 在同一研究中, 睡眠限制对多种认知任务产生的干扰效果不尽相同。

例如, Cohen-Zion 等人(2016)要求被试连续 4 天睡眠时长限制为 6~6.5 小时, 之后连续 4 天睡眠 10~10.5 小时, 在这 8 天内, 每 4 天后完成一系列任务测试, 包括注意任务、反应抑制任务、工作记忆任务、问题解决任务和视空加工任务等。结果发现, 与 10~10.5 小时的睡眠条件相比, 睡眠限制条件下的注意任务、反应抑制任务和问题解决任务等的成绩显著下降, 但工作记忆任务和视空加工任务的成绩无显著变化。另外, 多种认知任务(包括持续性注意任务、决策任务和三维图形旋转任务等)受完全睡眠剥夺的干扰程度也有所差异, 表现为持续性注意任务成绩随着清醒时间的延长而不断降低, 而其他两类复杂任务成绩则未受显著影响(Pilcher et al., 2007)。元分析研究也指出, 睡眠限制会导致多个认知功能受损, 其中对持续性注意、执行功能的负性影响最大, 但对多任务、冲动性决策、智力和问题解决等任务影响较小(Lim & Dinges, 2010; Lowe et al., 2017)。这可能是因为睡眠限制显著影响了基本的注意功能, 使得注意依赖型的任务表现更易受损; 同时, 完成较高层次的认知过程也需要一定程度的注意力参与, 因而这些任务的表现也会受到不同程度地影响。此外, 也有可能是不同认知领域任务加工所依赖的大脑皮层[如前额皮层与工作记忆等高级认知功能相关(Banks & Dinges, 2007; Lim & Dinges, 2010; McCoy & Strecker, 2011), 而长时记忆与海马体活动相关(van der Werf et al., 2009; Yoo et al., 2007)]受睡眠限制影响的敏感度不尽相同的缘故。

2.2　睡眠限制程度

睡眠限制的严重程度可通过睡眠限制时长和睡眠限制持续天数来衡量。限制时长越长, 即实际睡眠时长越短, 睡眠限制的程度越严重; 睡眠限制持续天数越多, 睡眠限制的程度越严重。已有研究表明, 睡眠限制对认知功能的负性影响受制于睡眠限制的时长和持续天数。具体而言, 随着睡眠限制时长的增加, 持续天数增多, 睡眠限制对认知功能的负性影响会更加明显(Banks & Dinges, 2007; Cote, Milner, Osip, Baker, & Cuthbert, 2008; de Bruin, van Run, Staaks, & Meijer, 2017)。例如, 有研究要求被试分别接受连续 14 天 4/6/8 小时睡眠和 3 晚完全睡眠剥夺条件, 并要求他们每天完成心理运动警觉性任务、数字符号替换任务和系列加减任务。结果发现, 在第 1 晚完全睡眠剥夺后, 所有任务表现都明显下降, 之后两晚完全睡眠剥夺后的任务表现持续小幅降低; 与另两个睡眠限制条件相比, 4 小时睡眠限制下的任务表现降低更为明显, 而且当连续多天睡眠限制为 4/6 小时时, 被试的心理运动警觉性任务和数字符号替换任务的成绩与 1 晚完全睡眠剥夺条件下的相当, 当连续 14 天睡眠限制为 4/6 小时时, 其所引起的认知损害与 3 晚完全睡眠剥夺产生的效果相同(van Dongen et al., 2003)。另一项研究也发现 1 晚完全睡眠剥夺与连续 7 晚 5 小时睡眠限制均会对心理运动警觉性任务产生巨大的负性影响, 且两者没有显著差异; 对错误记忆的坚持性也有相似程度的影响(Lo, Chong, Ganesan, Leong, & Chee, 2016)。这些结果说明, 认知功能既可能受到重度睡眠限制的即时性损害, 也可能受到持续的中轻度睡眠限制的渐进性损害, 并出现明显的累积效应, 即睡眠限制对心理认知功能的负性影响会随着睡眠限制程度的增加而加剧。这也提示人们, 为了保证日常工作和学习高效运行, 不仅要避免短期通宵熬夜, 也要避免长期慢性睡眠限制。

2.3　年龄

睡眠限制对个体认知加工的影响程度在不同年龄群体中存在显著差异。已有研究结果提示, 睡眠限制对认知功能的负性影响与年龄呈倒 U 型关系。具体而言, 睡眠限制对学龄儿童和青少年心理认知功能的负性影响较小(Beebe, Difrancesco, Tlustos, McNally, & Holland, 2009; Voderholzer et al., 2011), 对老年群体的认知功能的影响亦较不明显(Duffy, Willson, Wang, & Czeisler, 2009; Harrison & Horne, 2000; Zitting et al., 2018), 而对成年人的负性影响较大(Anderson & Horne, 2006; Banks et al., 2010)。例如, 有研究使用多样化的认知任务, 包括视觉短时记忆、自信判断和反应抑制任务等, 探究睡眠限制对青年人和老年人认知功能的影响, 结果发现, 在睡眠充足条件下, 老年人的认知表现劣于青少年, 但是在经历了 36 小时的睡眠剥夺后, 青少年的认知水平显著下降, 且与老年人的认知表现相似(Harrison & Horne, 2000)。一项考察青年人与老年人对长期睡眠限制的耐受程度的研究结果也表明, 在经历 3 周中轻度睡眠限制(每天 5.6 小时睡眠时长)后, 青年人的认知行为受损程度比老年人更加严重, 主要表现为青年人在完成

心理运动警觉性任务时出现更多的注意缺失错误(Zitting et al., 2018)。这些结果提示，年龄是影响睡眠限制对认知功能作用的一个重要因素，其潜在机制可能是不同年龄群体额叶皮层的主导性存在差异。前额皮层是负责很多高级认知功能的脑区，且易受睡眠限制影响(Banks & Dinges, 2007; Lim & Dinges, 2008, 2010)。Munch 等人(2004)探究了青年人群和老年人群对睡眠剥夺的脑电反应，结果发现，与基线睡眠(睡眠剥夺前一晚的 8 小时睡眠)相比，睡眠剥夺 40 小时后的恢复睡眠(8 小时)中只有青年人群显现出额叶区域的 delta 波优势(即额叶脑区反映了睡眠内稳态压力)，而老年人群却没有这种额叶优势。因此，老年人的认知功能较少受睡眠限制的影响可能是因为其额叶主导性相对不明显，即较之于其他年龄成年人，老年人更能适应睡眠限制引发的认知功能的下降。同时，这些对于年龄差异的探讨也为前额皮层假说提供了证据，可能成为未来研究深化扩展的一个重要方向。

2.4 性别

性别差异可能也是影响睡眠限制对认知功能作用的因素之一。目前关于睡眠限制对认知功能影响的性别差异研究相对较少，仅有的几项研究表明，在认知功能方面，女性似乎比男性更能忍受长时间的清醒(Binks, Waters, & Hurry, 1999; Corsi-Cabrera, Sanchez, del-Rio-Portilla, Villanueva, & Perez-Garci, 2003)。例如，早期的一项研究考察了睡眠剥夺对个体完成多种认知任务(包括词语联想测试、单词流畅测试、威斯康辛卡片分类任务、类别测试、斯特鲁普测试、连续加法任务和修订版韦氏智力量表)绩效的影响，结果发现，在经历 35 小时睡眠剥夺后，女性在修订版韦氏智力量表上的得分要显著高于男性(Binks et al., 1999)。之后的一项研究也发现，在经历 38 小时睡眠剥夺前后的警觉性任务反应时差异量上，女性要显著小于男性(Corsi-Cabrera et al., 2003)。但目前，这种适应睡眠限制的性别优势的形成机理尚不明确，有可能与先天进化过程中女性抚养子女的社会需求有关(Corsi-Cabrera et al., 2003)，也有可能是因为昼夜节律与月经期有关的荷尔蒙变化之间的交互作用(Baker & Driver, 2007; Wright & Badia, 1999)，亦或是由于睡眠结构上的性别差异(Dijk, 2009; Santhi et al., 2016)，还有可能是男女性本身的大脑结构和功能存在差异的缘故(Alhola & Polo-Kantola, 2007)。

2.5 其他因素

除了上述因素外，个别研究发现其他因素，如睡眠起止时间，也可能会影响睡眠限制对认知功能的作用。例如，有研究要求被试分别接受晚睡条件(睡眠起止时间为 03:00~07:00)或早醒条件(睡眠起止时间为 22:00~03:00)，醒后完成反应时任务、选择性注意任务和持续性注意任务。结果发现，相比于晚睡条件，在早醒条件下，被试的反应时任务的反应时明显更长(Jarraya et al., 2014)。出现上述差异的原因可能与异相睡眠(快速眼动睡眠)的缺失有关。因为异相睡眠在夜晚结束时增加，而在早醒条件下，被试因为缺少异相睡眠而导致昼夜节律系统的同步性紊乱。另外，也有可能是早醒条件下个体清醒时间更长，因而疲倦程度更高，导致任务表现更差。此外，有研究发现个体的气质类型也会制约睡眠限制对认知功能的影响。Vermeulen 等人(2016)发现，与睡眠时长受到限制的内向儿童相比，睡眠时长较长的内向儿童在完成心理运动警觉性任务时反应更慢、错误更多，工作记忆表现也更差；而外向儿童的任务表现不受睡眠限制的影响。这可能是由于内外向气质有不同的生理唤醒水平。有研究发现，较之于内向型个体，外向型个体的皮层唤醒水平更低(Eysenck, 1963; Hagemann et al., 2009)。所以这一结果可能解释为：根据耶克斯−多德森定律(Yerkes & Dodson, 1908)，内向者原本的唤醒水平高于最佳表现的唤醒水平，而睡眠限制降低了其唤醒程度，使得睡眠限制后的唤醒程度更接近于最佳表现的水平，所以睡眠时长较短的内向儿童的任务表现更好。

综上所述，已有众多研究表明，睡眠限制对认知功能的作用大小既会受到研究范式本身(如实验任务特性与睡眠限制程度)的影响，也与研究对象的个体特征(如年龄和性别)相关。未来研究需要进一步探究其他可能影响睡眠限制作用的变量，为厘清睡眠限制影响认知功能的作用机理提供借鉴与视角。

3 睡眠限制影响认知功能的作用机理

大量研究结果表明，睡眠限制对一系列认知领域的心理加工都会产生负性影响，同时研究者们对产生这些负性影响的潜在机理进行了探究，

提出了唤醒假说、注意控制假说、警觉性假说和前额皮层易感性假说。这些作用假说能够极大地帮助人们深入了解睡眠限制与个体身心功能之间的密切关系。

3.1　唤醒假说

早期, 研究者们使用广泛的认知任务发现了睡眠限制的负性影响, 并由此提出了唤醒假说。唤醒假说认为, 睡眠限制之所以会对任务表现产生干扰, 很大程度上是因为睡眠限制显著降低了个体的生理唤醒水平(Williams, Lubin, & Goodnow, 1959)。当个体睡眠时长受到限制时, 其唤醒水平过低, 不能达到最佳任务表现所需的唤醒水平, 因而其任务表现变差。

根据唤醒理论, 睡眠限制条件下个体总体唤醒水平较低, 而由于任务简单且枯燥, 心理运动警觉性任务等简单任务引发的唤醒水平也很低, 导致任务表现下降; 而复杂的认知任务具有挑战性, 任务本身引发的唤醒水平相对较高, 从而任务表现较少受损或基本保持稳定。这一理论在不少研究中都已得到验证。例如, 众多研究表明, 睡眠剥夺和长期睡眠限制对简单、单调且熟练的任务影响最为显著(Lee, Manousakis, Fielding, & Anderson, 2015; Lo, Bennion, & Chee, 2016; Lo, Ong et al., 2016); 而批判思维、逻辑推理和智力测试等复杂任务较少受到睡眠剥夺的影响(Demos et al., 2016; Drummond, Brown, Salamat, & Gillin, 2004), 因此, 唤醒假说能够在一定程度上解释睡眠限制对认知功能的影响。但是唤醒假说用于解释睡眠限制对一些复杂认知功能的影响时存在局限性: 譬如不少关于睡眠限制作用的元分析研究发现, 睡眠限制对很多认知任务都会产生显著损伤, 包括复杂的认知任务(Cohen-Zion et al., 2016; Jarraya et al., 2014; Miyata et al., 2015)。

作为早期理论, 唤醒假说在当时对于理解睡眠限制与认知功能之间的关系有很大帮助, 但是由于研究不断深入, 唤醒理论的不足开始显现, 研究者们开始寻求新的理论以尝试解释睡眠限制对认知功能影响的作用路径。

3.2　注意控制假说

许多早期关于睡眠限制对认知功能影响的研究发现, 高级认知功能测试不受完全睡眠剥夺的急性影响。例如, 在急性完全睡眠剥夺后, 被试完成巴德利逻辑推理测试的成绩表现持续稳定, 甚至在个体其他认知领域已经受损时仍保持稳定(Magill et al., 2003; Smith & Maben, 1993)。因此研究者们认为, 在缺乏精力的情况下, 新颖性和动机是决定任务表现的关键因素, 并提出了注意控制模型(Pilcher et al., 2007)。注意控制模型强调专注于任务的重要性, 认为任务的划分应该根据是否能促进个体对该任务的专注行为, 而不是根据认知复杂性程度。具体而言, 以警觉性为基础的任务应该被划分为低注意力任务, 因为这些任务不需要个体刻意专注于任务, 所以他们更难维持对该任务的控制注意; 而更复杂的认知任务则应被划分为高注意力任务, 因为这些任务提高了个体对任务行为反应的注意力, 更容易维持对当前任务的控制注意。当个体经受睡眠限制后, 单调任务或不需要太多认知参与的任务会受到更加明显的影响, 这是因为需要更多自上而下的注意控制来维持在这些任务上的最佳表现; 相反, 完成高注意力任务本身更易维持控制注意, 因此受睡眠限制的影响也较小(Lim & Dinges, 2010; Lowe et al., 2017)。

总结而言, 睡眠不足会影响人们的注意控制, 进而影响他们的工作能力, 因此, 注意控制理论可以更好地理解睡眠限制后个体诸多认知领域功能的受损状况。另外, 注意控制理论也存在一些局限。首先, 该理论只能在一定程度上反映个体对任务的关注度, 而这种关注度受到了持续操作和睡眠剥夺两种因素的影响, 并且很难对两者各自的影响进行分离。同时, 提出者们也指出, 现有的研究较多聚焦于持续性注意、反应抑制和工作记忆功能等, 因而该理论是否适用于所有认知领域尚不清楚(Pilcher et al., 2007)。因此, 未来研究需要设计更加严谨的实验设计来检验注意控制模型的适用性。

3.3　警觉性假说

警觉性假说认为睡眠限制引发的警觉性或生理觉醒的缺失是认知功能受损的关键, 而警觉性任务的反应时指标是测定由睡眠限制引起的认知加工受损程度的主要手段(Durmer & Dinges, 2005)。该假说将警觉性(持续性注意)看作是一种持续且易受睡眠限制影响的认知过程(Lim & Dinges, 2008), 同时认为高级认知任务的表现是由持续性注意能力直接决定的, 因此, 只有达到一定程度的警觉性水平才能出色地完成任务。当睡眠受到限制时,

持续性注意任务受损，同时会直接导致高级认知任务受到干扰。有研究者表示，受睡眠不足影响的认知领域非常广泛，因此，睡眠不足对认知表现的影响是非任务特异性的(Balkin, Rupp, Picchioni, & Wesensten, 2008)，即所有认知活动都会受到睡眠限制的影响。因此，警觉性假说认为，警觉性和持续性注意力对许多高级认知加工具有本质上的重要性：当个体不能维持足够的警觉水平时，那么更高层次的认知加工表现必然会变差(Lo, Ong et al., 2016)。

虽然已有强有力的实验证据支持警觉性的重要性：比如，持续性注意测试(如心理运动警觉性测试)在预测真实生活中的表现和评估疲劳状态下的受损程度中非常可靠，而且效度很高(Lim & Dinges, 2008; Lowe et al., 2017; Short, Weber, Reynolds, Coussens, & Carskadon, 2018)；同时，在睡眠剥夺或连续多日睡眠限制的情况下，心理运动警觉性测试对追踪昼夜节律和内稳态调节方面的变化也极其敏感(Hudson, van Dongen, & Honn, 2020; Lim & Dinges, 2008)，但这一理论存在较为明显的缺陷：根据警觉性理论，当个体的睡眠时长受到限制时，持续性注意任务受损，同时直接导致高级任务加工受到损害，从而推断各认知任务受损程度应该大致相同(Balkin et al., 2008)。但这一推断与部分研究结果(睡眠限制对简单任务的负性影响较大，对复杂任务的负性影响较小)并不符合，因此，警觉性假说只能在一定程度上解释睡眠限制的负性影响。

3.4 前额皮层易感性假说

随着认知神经科学技术的发展，许多神经成像和电生理学研究开始探究由睡眠不足引起的大脑皮层功能变化的特点。研究结果似乎表明，不同部位的大脑皮层对睡眠限制的易感性存在差异。相对而言，前额皮层比其他皮层更容易受到完全睡眠剥夺的影响。前额皮层被认为是负责调控更高级认知功能(Stuss, 2011; Yuan & Raz, 2014)和成功维持持续性注意能力(Langner & Eickhoff, 2013)的主要皮层。研究发现，睡眠不足会损害一些认知任务表现，而这些任务正是由前额皮层负责的(Killgore, 2010; Lim & Dinges, 2010; McCoy & Strecker, 2011)。例如, Harrison, Horne 和 Rothwell (2000)要求被试保持 36 个小时的清醒，然后完成一组神经心理测试，结果发现，睡眠剥夺对前额皮层参与的测试(时间记忆、语言流利和反应抑制任务)表现产生显著损害，但是对海马体参与的再认记忆任务的成绩没有影响。来自事件相关电位(ERP)的研究也证明前额皮层更易受睡眠限制的影响。例如, Zhang 等人(2019)要求被试接受 36 小时睡眠剥夺条件，并在睡眠剥夺前后均完成工作记忆测试，结果发现，与睡眠剥夺前相比，睡眠剥夺后被试的反应时变长，而且额叶皮层的 P200 幅度减缓。类似地，近红外光学成像(NIRS)研究结果发现，与正常睡眠相比，在经受完全睡眠剥夺后，个体大脑双侧背外侧前额皮层上的活动减少(Chee & Choo, 2004; Drummond et al., 2005)；睡眠限制会减少大脑流向额叶的局部血流(Li et al., 2017; Miyata et al., 2015; Miyata et al., 2010)，且这些脑功能上的变化与由睡眠不足引起的受损的任务表现有直接关联。上述行为及神经生理层面的研究结果支持了睡眠限制的前额皮层易感性假说，但个别研究发现睡眠限制后前额皮层活动增加。譬如, Chee 和 Choo (2004)发现，当被试接受完全睡眠剥夺条件后，其完成更加复杂的任务时前额皮层激活有所增加，因此猜测前额皮层活动变化可能会受到任务类型的影响。未来研究需要深入探索睡眠限制、大脑皮层活动与任务表现三者间的作用关系。

总结而言，睡眠限制影响认知功能的作用机理存在多种可能假说，但上述假说并不是相互对立的。例如，睡眠剥夺后在前额皮层上的损伤可能既是执行功能，也可能是基本注意功能发生变化的结果，体现了前额皮层在自上而下和自下而上加工中的重要作用(Boonstra, Stins, Daffertshofer, & Beek, 2007)。因此，这些假说是从不同的角度解释了同一种现象。另外，以上四个假说各有优缺点，解释力和适用范围均存在一定局限。例如，唤醒假说和警觉性假说难以解释睡眠限制对复杂认知功能的影响；注意控制假说难以分离持续性操作和睡眠剥夺各自对认知功能的影响。因此，基于目前这些假说的局限性和片面性，未来研究可以通过更加先进的技术(如 EEG-fMRI 同步记录)和更加精准的实验设计检验其可靠性。此外，这些作用假说看似各自独立，但可能存在内在关联。例如，现有研究结果表明，个体特征(如年龄)是影响前额皮层功能的一个重要因素，同时 fMRI 研究也证明，除了参与高级执行功能加工之外，

前额皮层也是警觉性加工的一个重要脑区(de Dreu, Schouwenaars, Rutten, Ramsey, & Jansma, 2019; Thimm et al., 2006)。因此, 未来研究可以统合睡眠限制后脑活动、生理唤醒和行为反应等多种信号的变化特点, 尝试构建一个如图 1 所示的整合性理论框架或提出一个适用范围更广的理论假说, 这对于人们深入认识睡眠限制与身心健康之间的密切关系以及睡眠限制相关研究的理论建构具有十分重大的意义。

4　未来研究方向

尽管睡眠限制对认知功能的影响已经得到较为广泛的研究和验证, 但仍然存在一些不足和局限。第一, 已有的睡眠限制研究对不同人群认知功能影响的差异性及其内在机理缺乏深入探讨。实际上, 不同个体间存在着巨大差异, 如睡眠需要、睡眠类型和对睡眠不足的耐受性等等。已有研究发现, 大多数健康个体会随着睡眠限制而出现认知神经缺陷, 但不同个体间的缺陷程度存在显著差异(Tkachenko & Dinges, 2018)。比如, Mu 等人(2005)选取了 10 个易受损和 10 个不易受损的被试, 将这些被试在正常睡眠和睡眠剥夺下工作记忆任务的脑激活模式进行对比, 结果发现, 在睡眠剥夺后, 两组被试的额顶叶激活均减少, 同时, 相比易受损被试, 不易受损被试在正常睡眠和睡眠剥夺情况下额顶叶激活均明显更多。随后一项研究发现, 在正常睡眠条件下左侧额顶叶脑区激活更强的被试在睡眠剥夺后记忆表现会更好(Chee et al., 2006)。与睡眠内稳态压力和昼夜节律相关的 PERIOD3(PER3)基因的差异可能可以解释不同个体受睡眠限制影响的特异性。PER3 是一个数量可变的等位基因串联的多态性基因, 大约有 10%个体的 $PER3$ 有 5 个等位基因, 即为 $PER3^{5/5}$, 其余个体所拥有的基因则为 $PER3^{4/4}$。已有综述表明, 相比 $PER3^{4/4}$ 基因, $PER3^{5/5}$ 基因与睡眠内稳态压力和昼夜节律的关系更为紧密, 即 $PER3^{5/5}$ 个体更易受睡眠限制的影响(Dijk & Archer, 2010)。但就目前而言, 睡眠不足易感性的个体间差异的生物学和神经生物学上的机制还不十分明确, 因此, 未来的研究需要系统地探索在睡眠限制影响角度上出现个体间差异的生物学因子。

第二, 由于研究技术局限, 睡眠限制对大脑神经活动与行为表现的影响及三者间关系尚不明晰。关于睡眠限制如何影响脑激活, 以及神经反应如何与行为表现变化相关这些问题, fMRI 研究已经在很大程度上丰富了我们的理解, 但是血氧水平依赖(BOLD)对比的方法存在一些本质的技术与方法缺陷, 可能会限制其将来在睡眠限制研究上的应用。血氧水平依赖对比的方法通过含氧血量与缺氧血量之间的变化而测量相对信号变化, 但在测量过程中, 信号中会出现低频噪音(Friston et al., 2000), 影响血氧水平依赖对于长于几分钟的慢速神经活动变化追踪的敏感度(Aguirre, Detre, Zarahn, & Alsop, 2002)。由于信号变化非常微弱, 通常只能使用统计方法判断哪些脑区有信号变化, 因此血氧水平依赖对比方法对睡眠限制引发活性变化的脑区进行定位的精确性欠佳, 故难以全面深入地了解睡眠限制的生理基础。近来, 动脉自旋标记灌注功能磁共振成像技术(ASL Perfusion fMRI)发展迅猛。该神经成像技术利用磁性标记的上游动脉血水作为扩散示踪剂, 待已标记的血水对人脑组织灌注后, 进行全脑快速成像, 然后与非磁化标记的图像进行减影, 从而获得组织灌注参数图。这一技术可以通过非侵入性的成像方法来绝对量化认知任务执行过程和休息状态过程中的脑血流(Rao, Gillihan et al., 2007; Rao, Wang, Tang, Pan, & Detre, 2007)。另外, 动脉自旋标记灌注功能磁共振成像技术也可以在长时间内提供可靠的脑血流测量(Wang et al., 2003), 即信噪比得以提高, 从而可以定位到更加精确的脑区, 增加空间分辨率和敏感度, 克服了血氧水平依赖技术信噪比低、定位精确度差的缺点。这些特性表明,

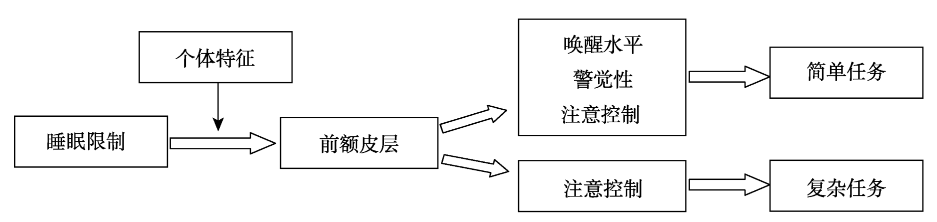


图 1　睡眠限制对认知功能影响的整合性理论框架

该技术可能是探究睡眠限制生理基础的一个优势技术。这一技术不仅可以得到睡眠限制后完成认知任务时大脑皮层上绝对量化的生理数据，还可以更加精确地观察到大脑脑区皮层上的变化。目前该神经成像技术已广泛应用于临床医学研究(Fujiwara et al., 2017; Grade et al., 2015)，具有很大的实用价值和潜力。因此，未来研究可以使用这项技术更进一步地探究睡眠限制、生理基础与认知功能表现之间的关系。

第三，已有研究较多关注中重度睡眠限制对个体认知功能的影响，对轻度睡眠限制的影响缺乏探讨。实际上，探究轻度睡眠限制对个体身心健康的影响更具现实指导意义。已有元分析发现，现有大多数睡眠限制研究中操纵的睡眠时长大约为 3.83 小时(Lowe et al., 2017)。然而，在现实生活中，成年人在工作日的平均睡眠时长大约是 6.7 小时(Hirshkowitz et al., 2015)，所以，这些中重度睡眠限制的研究结果对在实际生活中经受轻度睡眠限制的人群的参考意义较为有限。Stojanoski 等人(2019)的一项研究发现，当成年被试的夜间睡眠时长缩短 2 小时(轻度睡眠限制)时，其认知功能也会受到显著损害，表现为完成警觉性任务时错误更多、反应更慢，且信息加工容量减少，执行动作开始更慢。不过，这项研究的被试仅经受了 1 晚的轻度睡眠限制，中长期的轻度睡眠限制会对个体的身心功能产生何种程度的影响尚不明确。目前关于中长期轻度睡眠限制的研究数量较少，因此，未来研究者们可以通过操纵多晚或数周的轻度睡眠限制来考察中长期轻度睡眠限制对个体身心功能的影响。

5 小结

睡眠限制是现代社会人群中普遍存在的现象，可能会显著危害个体身心健康，影响其工作与学习效率，甚至引发严重的生产或交通安全事故，因此研究睡眠限制对个体认知功能的影响具有重大应用价值。目前，睡眠限制对认知功能影响的研究结果并不十分一致，而实验选用的任务类型、睡眠限制的严重程度、个体年龄和性别等因素都会影响睡眠限制对认知功能的作用。研究者们提出了多种可能性的作用假说。未来研究需要通过更加严谨科学的实验设计和更多先进的方法技术，全面探讨睡眠限制对个体身心健康的影响，并据此寻求能够有效对抗睡眠限制负性影响的干预措施。

参考文献

Aguirre, G. K., Detre, J. A., Zarahn, E., & Alsop, D. C. (2002). Experimental design and the relative sensitivity of BOLD and perfusion fMRI. *Neuroimage, 15*(3), 488–500. doi:10.1006/nimg.2001.0990

Alhola, P., & Polo-Kantola, P. (2007). Sleep deprivation: Impact on cognitive performance. *Neuropsychiatric Disease and Treatment, 3*(5), 553–567.

Anderson, C., & Horne, J. A. (2006). Sleepiness enhances distraction during a monotonous task. *Sleep, 29*(4), 573–576. doi:10.1093/sleep/29.4.573

Atkinson, R. C., & Shiffrin, R. M. (1968). Human memory: A proposed system and its control processes. *Psychology of Learning and Motivation, 2*, 89–195. doi:10.1016/S0079-7421(08)60422-3

Baker, F. C., & Driver, H. S. (2007). Circadian rhythms, sleep, and the menstrual cycle. *Sleep Medicine, 8*(6), 613–622. doi:10.1016/j.sleep.2006.09.011

Balkin, T. J., Rupp, T., Picchioni, D., & Wesensten, N. J. (2008). Sleep loss and sleepiness: Current issues. *Chest, 134*(3), 653–660. doi:10.1378/chest.08-1064

Banks, S., & Dinges, D. F. (2007). Behavioral and physiological consequences of sleep restriction. *Journal of Clinical Sleep Medicine, 3*(5), 519–528.

Banks, S., van Dongen, H. P. A., Maislin, G., & Dinges, D. F. (2010). Neurobehavioral dynamics following chronic sleep restriction: Dose-response effects of one night for recovery. *Sleep, 33*(8), 1013–1026. doi:10.1093/sleep/33.8.1013

Beebe, D. W., Difrancesco, M. W., Tlustos, S. J., McNally, K. A., & Holland, S. K. (2009). Preliminary fMRI findings in experimentally sleep-restricted adolescents engaged in a working memory task. *Behavioral and Brain Functions, 5*, 9. doi:10.1186/1744-9081-5-9

Binks, P. G., Waters, W. F., & Hurry, M. (1999). Short-term total sleep deprivations does not selectively impair higher cortical functioning. *Sleep, 22*(3), 328–334. doi:10.1093/sleep/22.3.328

Boonstra, T. W., Stins, J. F., Daffertshofer, A., & Beek, P. J. (2007). Effects of sleep deprivation on neural functioning: An integrative review. *Cellular and Molecular Life Sciences, 64*(7-8), 934–946. doi:10.1007/s00018-007-6457-8

Carskadon, M. A., Harvey, K., & Dement, W. C. (1981). Acute restriction of nocturnal sleep in children. *Perceptual and Motor Skills, 53*(1), 103–112. doi:10.2466/pms.1981.53.1.103

Cedernaes, J., Sand, F., Liethof, L., Lampola, L., Hassanzadeh,

S., Axelsson, E. K., ... Benedict, C. (2016). Learning and sleep-dependent consolidation of spatial and procedural memories are unaltered in young men under a fixed short sleep schedule. *Neurobiology of Learning and Memory, 131*, 87–94. doi:10.1016/j.nlm.2016.03.012

Chee, M. W. L., & Choo, W. C. (2004). Functional imaging of working memory after 24 hr of total sleep deprivation. *Journal of Neuroscience, 24*(19), 4560–4567. doi:10.1523/Jneurosci.0007-04.2004

Chee, M. W. L., Chuah, L. Y., Venkatraman, V., Chan, W. Y., Philip, P., & Dinges, D. F. (2006). Functional imaging of working memory following normal sleep and after 24 and 35 h of sleep deprivation: Correlations of fronto-parietal activation with performance. *Neuroimage, 31*(1), 419–428. doi:10.1016/j.neuroimage.2005.12.001

Cohen-Zion, M., Shabi, A., Levy, S., Glasner, L., & Wiener, A. (2016). Effects of partial sleep deprivation on information processing speed in adolescence. *Journal of the International Neuropsychological Society, 22*(4), 388–398. doi:10.1017/S1355617716000072

Corsi-Cabrera, M., Sanchez, A. I., del-Rio-Portilla, Y., Villanueva, Y., & Perez-Garci, E. (2003). Effect of 38 h of total sleep deprivation on the waking EEG in women: Sex differences. *International Journal of Psychophysiology, 50*(3), 213–224. doi:10.1016/s0167-8760(03)00168-5

Cote, K. A., Milner, C. E., Osip, S. L., Baker, M. L., & Cuthbert, B. P. (2008). Physiological arousal and attention during a week of continuous sleep restriction. *Physiology & Behavior, 95*(3), 353–364. doi:10.1016/j.physbeh.2008.06.016

Cousins, J. N., Sasmita, K., & Chee, M. W. L. (2018). Memory encoding is impaired after multiple nights of partial sleep restriction. *Journal of Sleep Research, 27*(1), 138–145. doi:10.1111/JSR.12578

Cunningham, J. E. A., Jones, S. A. H., Eskes, G. A., & Rusak, B. (2018). Acute sleep restriction has differential effects on components of attention. *Frontiers in Psychiatry, 9*, 499. doi:10.3389/fpsyt.2018.00499

de Bruin, E. J., van Run, C., Staaks, J., & Meijer, A. M. (2017). Effects of sleep manipulation on cognitive functioning of adolescents: A systematic review. *Sleep Medicine Reviews, 32*, 45–57. doi:10.1016/j.smrv.2016.02.006

de Dreu, M. J., Schouwenaars, I. T., Rutten, G. M., Ramsey, N. F., & Jansma, J. M. (2019). Brain activity associated with expected task difficulty. *Frontiers in Human Neuroscience, 13*, 286. doi:10.3389/fnhum.2019.00286

Demos, K. E., Hart, C. N., Sweet, L. H., Mailloux, K. A., Trautvetter, J., Williams, S. E., ... McCaffery, J. M. (2016). Partial sleep deprivation impacts impulsive action but not impulsive decision-making. *Physiology & Behavior, 164*, 214–219. doi:10.1016/j.physbeh.2016.06.003

Dijk, D. J. (2009). Regulation and functional correlates of slow wave sleep. *Journal of Clinical Sleep Medicine, 5*(2), S6–S15.

Dijk, D. J., & Archer, S. N. (2010). PERIOD3, circadian phenotypes, and sleep homeostasis. *Sleep Medicine Reviews, 14*(3), 151–160. doi:10.1016/j.smrv.2009.07.002

Dinges, D. F., & Powell, J. W. (1985). Microcomputer analyses of performance on a portable, simple visual RT task during sustained operations. *Behavior Research Methods, Instruments, & Computers, 17*(6), 652–655. doi:10.3758/BF03200977

Drummond, S. P. A., Brown, G. G., Salamat, J. S., & Gillin, J. C. (2004). Increasing task difficulty facilitates the cerebral compensatory response to total sleep deprivation. *Sleep, 27*(3), 445–451.

Drummond, S. P. A., Meloy, M. J., Yanagi, M. A., Orff, H. J., & Brown, G. G. (2005). Compensatory recruitment after sleep deprivation and the relationship with performance. *Psychiatry Research-Neuroimaging, 140*(3), 211–223. doi:10.1016/j.pscychresns.2005.06.007

Duffy, J. F., Willson, H. J., Wang, W., & Czeisler, C. A. (2009). Healthy older adults better tolerate sleep deprivation than young adults. *Journal of the American Geriatrics Society, 57*(7), 1245–1251. doi:10.1111/J.1532-5415.2009.02303.X

Durmer, J. S., & Dinges, D. F. (2005). Neurocognitive consequences of sleep deprivation. *Seminars in Neurology, 25*(1), 117–129. doi:10.1055/s-2005-867080

Eysenck, H. J. (1963). Biological Basis of Personality. *Nature, 199*, 1031–1034. doi:10.1038/1991031a0

Fallone, G., Acebo, C., Arnedt, J. T., Seifer, R., & Carskadon, M. A. (2001). Effects of acute sleep restriction on behavior, sustained attention, and response inhibition in children. *Perceptual and Motor Skills, 93*(1), 213–229. doi:10.2466/pms.2001.93.1.213

Friston, K. J., Josephs, O., Zarahn, E., Holmes, A. P., Rouquette, S., & Poline, J. B. (2000). To smooth or not to smooth?: Bias and efficiency in fMRI time-series analysis. *Neuroimage, 12*(2), 196–208. doi:10.1006/nimg.2000.0609

Fujiwara, Y., Matsuda, T., Kanamoto, M., Tsuchida, T., Tsuji, K., Kosaka, N., ... Kimura, H. (2017). Comparison of long-labeled pseudo-continuous arterial spin labeling (ASL) features between young and elderly adults: Special reference to parameter selection. *Acta Radiologica, 58*(1), 84–90. doi:10.1177/0284185116632387

Goel, N., Abe, T., Braun, M. E., & Dinges, D. F. (2014). Cognitive workload and sleep restriction interact to influence sleep homeostatic responses. *Sleep, 37*(11), 1745–1756. doi:10.5665/sleep.4164

Grade, M., Hernandez Tamames, J. A., Pizzini, F. B., Achten, E., Golay, X., & Smits, M. (2015). A neuroradiologist's guide to arterial spin labeling MRI in clinical practice. *Neuroradiology, 57*(12), 1181–1202. doi:10.1007/s00234-015-1571-z

Hagemann, D., Hewig, J., Walter, C., Schankin, A., Danner, D., & Naumann, E. (2009). Positive evidence for Eysenck's arousal hypothesis: A combined EEG and MRI study with multiple measurement occasions. *Personality and Individual Differences, 47*(7), 717–721. doi:10.1016/j.paid.2009.06.009

Harrison, Y., & Horne, J. A. (2000). The impact of sleep deprivation on decision making: A review. *Journal of Experimental Psychology: Applied,* 6(3), 236–249. doi:10.1037/1076-898x.6.3.236

Harrison, Y., Horne, J. A., & Rothwell, A. (2000). Prefrontal neuropsychological effects of sleep deprivation in young adults — A model for healthy aging? *Sleep, 23*(8), 1067–1073. doi:10.1093/sleep/23.8.1f

Hirshkowitz, M., Whiton, K., Albert, S. M., Alessi, C., Bruni, O., DonCarlos, L., ... Adams Hillard, P. J. (2015). National Sleep Foundation's sleep time duration recommendations: Methodology and results summary. *Sleep Health, 1*(1), 40–43. doi:10.1016/j.sleh.2014.12.010

Hudson, A. N., van Dongen, H. P. A., & Honn, K. A. (2020). Sleep deprivation, vigilant attention, and brain function: A review. *Neuropsychopharmacology, 45*(1), 21–30. doi:10.1038/s41386-019-0432-6

Jarraya, S., Jarraya, M., Chtourou, H., & Souissi, N. (2014). Effect of time of day and partial sleep deprivation on the reaction time and the attentional capacities of the handball goalkeeper. *Biological Rhythm Research, 45*(2), 183–191. doi:10.1080/09291016.2013.787685

Jiang, F., vanDyke, R. D., Zhang, J., Li, F., Gozal, D., & Shen, X. (2011). Effect of chronic sleep restriction on sleepiness and working memory in adolescents and young adults. *Journal of Clinical and Experimental Neuropsychology, 33*(8), 892–900. doi:10.1080/13803395.2011.570252

Killgore, W. D. S. (2010). Effects of sleep deprivation on cognition. *Progress in Brain Research, 185*, 105–129. doi:10.1016/B978-0-444-53702-7.00007-5

Lahti, T., Sysi-Aho, J., Haukka, J., & Partonen, T. (2011). Work-related accidents and daylight saving time in Finland. *Occupational Medicine-Oxford, 61*(1), 26–28. doi:10.1093/occmed/kqq167

Langner, R., & Eickhoff, S. B. (2013). Sustaining attention to simple tasks: A meta-analytic review of the neural mechanisms of vigilant attention. *Psychological Bulletin, 139*(4), 870–900. doi:10.1037/a0030694

Lee, J., Manousakis, J., Fielding, J., & Anderson, C. (2015). Alcohol and sleep restriction combined reduces vigilant attention, whereas sleep restriction alone enhances distractibility. *Sleep, 38*(5), 765–775. doi:10.5665/sleep.4672

Leong, R. L. F., Koh, S. Y. J., Tandi, J., Chee, M. W. L., & Lo, J. C. (2017). Multiple nights of partial sleep deprivation do not affect prospective remembering at long delays. *Sleep Medicine, 44*, 19–23. doi:10.1016/j.sleep.2017.09.037

Li, C. Y., Huang, D. Q., Qi, J. L., Chang, H. S., Meng, Q. Q., Wang, J., ... Zhang, X. (2017). Short-term memory deficits correlate with hippocampal-thalamic functional connectivity alterations following acute sleep restriction. *Brain Imaging and Behavior, 11*(4), 954–963. doi:10.1007/s11682-016-9570-1

Lim, J., & Dinges, D. F. (2008). Sleep deprivation and vigilant attention. *Annals of the New York Academy of Sciences, 1129*, 305–322. doi:10.1196/annals.1417.002

Lim, J., & Dinges, D. F. (2010). A meta-analysis of the impact of short-term sleep deprivation on cognitive variables. *Psychological Bulletin, 136*(3), 375–389. doi:10.1037/a0018883

Lo, J. C., Bennion, K. A., & Chee, M. W. L. (2016). Sleep restriction can attenuate prioritization benefits on declarative memory consolidation. *Journal of Sleep Research, 25*(6), 664–672. doi:10.1111/jsr.12424

Lo, J. C., Chong, P. L. H., Ganesan, S., Leong, R. L. F., & Chee, M. W. L. (2016). Sleep deprivation increases formation of false memory. *Journal of Sleep Research, 25*(6), 673–682. doi:10.1111/jsr.12436

Lo, J. C., Ong, J. L., Leong, R. L. F., Gooley, J. J., & Chee, M. W. L. (2016). Cognitive performance, sleepiness, and mood in partially sleep deprived adolescents: The need for sleep study. *Sleep, 39*(3), 687–698. doi:10.5665/sleep.5552

Lowe, C. J., Safati, A., & Hall, P. A. (2017). The neurocognitive consequences of sleep restriction: A meta-analytic review. *Neuroscience and Biobehavioral Reviews, 80*, 586–604. doi:10.1016/j.neubiorev.2017.07.010

Magill, R. A., Waters, W. F., Bray, G. A., Volaufova, J., Smith, S. R., Lieberman, H. R., ... Ryan, D. H. (2003). Effects of tyrosine, phentermine, caffeine D-amphetamine, and placebo on cognitive and motor performance deficits during sleep deprivation. *Nutritional Neuroscience, 6*(4), 237–246. doi:10.1080/1028415031000120552

McCoy, J. G., & Strecker, R. E. (2011). The cognitive cost of sleep lost. *Neurobiology of Learning and Memory, 96*(4), 564–582. doi:10.1016/j.nlm.2011.07.004

Miyake, A., & Friedman, N. P. (2012). The nature and organization of individual differences in executive functions: Four general conclusions. *Current Direction in Psychological Science, 21*(1), 8–14. doi:10.1177/0963721411429458

Miyake, A., Friedman, N. P., Emerson, M. J., Witzki, A. H.,

Howerter, A., & Wager, T. D. (2000). The unity and diversity of executive functions and their contributions to complex "Frontal Lobe" tasks: A latent variable analysis. *Cognitive Psychology, 41*(1), 49–100. doi:10.1006/COGP.1999.0734

Miyata, S., Noda, A., Iwamoto, K., Kawano, N., Banno, M., Tsuruta, Y., ... Ozaki, N. (2015). Impaired cortical oxygenation is related to mood disturbance resulting from three nights of sleep restriction. *Sleep and Biological Rhythms, 13*(4), 387–394. doi:10.1111/SBR.12130

Miyata, S., Noda, A., Ozaki, N., Hara, Y., Minoshima, M., Iwamoto, K., ... Koike, Y. (2010). Insufficient sleep impairs driving performance and cognitive function. *Neuroscience Letters, 469*(2), 229–233. doi:10.1016/j.neulet.2009.12.001

Mu, Q., Mishory, A., Johnson, K. A., Nahas, Z., Kozel, F. A., Yamanaka, K., ... George, M. S. (2005). Decreased brain activation during a working memory task at rested baseline is associated with vulnerability to sleep deprivation. *Sleep, 28*, 433–446. doi:10.1093/sleep/28.4.433

Munch, M., Knoblauch, V., Blatter, K., Schroder, C., Schnitzler, C., Krauchi, K., ... Cajochen, C. (2004). The frontal predominance in human EEG delta activity after sleep loss decreases with age. *European Journal of Neuroscience, 20*(5), 1402–1410. doi:10.1111/j.1460-9568.2004.03580.x

Oken, B. S., Salinsky, M. C., & Elsas, S. M. (2006). Vigilance, alertness, or sustained attention: Physiological basis and measurement. *Clinical Neurophysiology, 117*(9), 1885–1901. doi:10.1016/j.clinph.2006.01.017

Petersen, S. E., & Posner, M. I. (2012). The attention system of the human brain: 20 years after. *Annual Review of Neuroscience, 35*, 73–89. doi: 10.1146/annurev-neuro-062111-150525

Pilcher, J. J., Band, D., Odle-Dusseau, H. N., & Muth, E. R. (2007). Human performance under sustained operations and acute sleep deprivation conditions: Toward a model of controlled attention. *Aviation Space and Environmental Medicine, 78*(5), B15–B24.

Poudel, G. R., Innes, C. R. H., & Jones, R. D. (2013). Distinct neural correlates of time-on-task and transient errors during a visuomotor tracking task after sleep restriction. *Neuroimage, 77*, 105–113. doi: 10.1016/j.neuroimage.2013.03.054

Rao, H. Y., Gillihan, S. J., Wang, J. J., Korczykowski, M., Sankoorikal, G. M. V., Kaercher, K. A., ... Farah, M. J. (2007). Genetic variation in serotonin transporter alters resting brain function in healthy individuals. *Biological Psychiatry, 62*(6), 600–606. doi:10.1016/j.biopsych.2006.11.028

Rao, H. Y., Wang, D. J. J., Tang, K., Pan, W., & Detre, J. A. (2007). Imaging brain activity during natural vision using CASL perfusion fMRI. *Human Brain Mapping, 28*(7), 593–601. doi:10.1002/hbm.20288

Roehrs, T., Burduvali, E., Bonahoom, A., Drake, C., & Roth, T. (2003). Ethanol and sleep loss: A "dose" comparison of impairing effects. *Sleep, 26*(8), 981–985. doi: 10.1093/sleep/26.8.981

Saadat, H., Bissonnette, B., Tumin, D., Thung, A., Rice, J., Barry, N. D., & Tobias, J. (2016). Time to talk about work-hour impact on anesthesiologists: The effects of sleep deprivation on Profile of Mood States and cognitive tasks. *Pediatric Anesthesia, 26*(1), 66–71. doi: 10.1111/PAN.12809

Sadeh, A., Gruber, R., & Raviv, A. (2003). The effects of sleep restriction and extension on school-age children: What a difference an hour makes. *Child Development, 74*(2), 444–455. doi:10.1111/1467-8624.7402008

Santhi, N., Lazar, A. S., McCabe, P. J., Lo, J. C., Groeger, J. A., & Dijk, D. J. (2016). Sex differences in the circadian regulation of sleep and waking cognition in humans. *Proceedings of the National Academy Sciences of the United States of America, 113*(19), E2730–E2739. doi:10.1073/pnas.1521637113

Short, M. A., Weber, N., Reynolds, C., Coussens, S., & Carskadon, M. A. (2018). Estimating adolescent sleep need using dose-response modeling. *Sleep, 41*(4). doi:10.1093/sleep/zsy011

Smith, A., & Maben, A. (1993). Effects of sleep deprivation, lunch, and personality on performance, mood, and cardiovascular function. *Physiology & Behavior, 54*(5), 967–972. doi:10.1016/0031-9384(93)90310-c

Stenuit, P., & Kerkhofs, M. (2008). Effects of sleep restriction on cognition in women. *Biological Psychology, 77*(1), 81–88. doi:10.1016/j.biopsycho.2007.09.011

St-Onge, M. P., & Zuraikat, F. M. (2019). Reciprocal roles of sleep and diet in cardiovascular health: A review of recent evidence and a potential mechanism. *Current Atherosclerosis Reports, 21*(3), 11. doi:10.1007/s11883-019-0772-z

Stojanoski, B., Benoit, A., van den Berg, N., Ray, L. B., Owen, A. M., Zandi, A. S., ... Fogel, S. M. (2019). Sustained vigilance is negatively affected by mild and acute sleep loss reflected by reduced capacity for decision making, motor preparation, and execution. *Sleep, 42*(1). doi:10.1093/sleep/zsy200

Stuss, D. T. (2011). Functions of the frontal lobes: Relation to executive functions. *Journal of the International Neuropsychological Society, 17*(5), 759–765. doi:10.1017/S1355617711000695

Thimm, M., Fink, G. R., Küst, J., Karbe, H., & Sturm, W. (2006). Impact of alertness training on spatial neglect: A behavioural and fMRI study. *Neuropsychologia, 44*(7),

1230–1246. doi:10.1016/j.neuropsychologia.2005.09.008

Tkachenko, O., & Dinges, D. F. (2018). Interindividual variability in neurobehavioral response to sleep loss: A comprehensive review. *Neuroscience and Biobehavioral Reviews, 89*, 29–48. doi:10.1016/j.neubiorev.2018.03.017

van der Heijden, K. B., Vermeulen, M. C. M., Donjacour, C. E. H. M., Gordijn, M. C. M., Hamburger, H. L., Meijer, A. M., ... Weysen, T. (2018). Chronic sleep reduction is associated with academic achievement and study concentration in higher education students. *Journal of Sleep Research, 27*(2), 165–174. doi:10.1111/jsr.12596

van der Werf, Y. D., Altena, E., Schoonheim, M. M., Sanz-Arigita, E. J., Vis, J. C., de Rijke, W., & van Someren, E. J. W. (2009). Sleep benefits subsequent hippocampal functioning. *Nature Neuroscience, 12*(2), 122–123. doi:10.1038/nn.2253

van Dongen, H. P. A., Maislin, G., Mullington, J. M., & Dinges, D. F. (2003). The cumulative cost of additional wakefulness: dose-response effects on neurobehavioral functions and sleep physiology from chronic sleep restriction and total sleep deprivation. *Sleep, 26*(2), 117–126. doi:10.1093/sleep/26.2.117

Vermeulen, M. C. M., Astill, R. G., Benjamins, J. S., Swaab, H., van Someren, E. J. W., & van der Heijden, K. B. (2016). Temperament moderates the association between sleep duration and cognitive performance in children. *Journal of Experimental Child Psychology, 144*, 184–198. doi:10.1016/J.JECP.2015.11.014

Versace, F., Cavallero, C., de Min Tona, G., Mozzato, M., & Stegagno, L. (2006). Effects of sleep reduction on spatial attention. *Biological Psychology, 71*(3), 248–255. doi:10.1016/j.biopsycho.2005.04.003

Voderholzer, U., Piosczyk, H., Holz, J., Landmann, N., Feige, B., Loessl, B., ... Nissen, C. (2011). Sleep restriction over several days does not affect long-term recall of declarative and procedural memories in adolescents. *Sleep Medicine, 12*(2), 170–178. doi:10.1016/j.sleep.2010.07.017

Wang, J. J., Aguirre, G. K., Kimberg, D. Y., Roc, A. C., Li, L., & Detre, J. A. (2003). Arterial spin labeling perfusion fMRI with very low task frequency. *Magnetic Resonance in Medicine, 49*(5), 796–802. doi:10.1002/mrm.10437

Williams, H. L., Lubin, A., & Goodnow, J. J. (1959). Impaired performance with acute sleep loss. *Psychological Monographs: General and Applied, 73*(14), 1–26. doi:10.1037/h0093749

Wright Jr, K. P., & Badia, P. (1999). Effects of menstrual cycle phase and oral contraceptives on alertness, cognitive performance, and circadian rhythms during sleep deprivation. *Behavioural Brain Research, 103*(2), 185–194. doi:10.1016/s0166-4328(99)00042-x

Yerkes, R. M., & Dodson, J. D. (1908). The relation of strength of stimulus to rapidity of habit-formation. *Journal of Comparative Neurology and Psychology, 18*(5), 459–482. doi:10.1002/cne.920180503

Yoo, S. S., Hu, P. T., Gujar, N., Jolesz, F. A., & Walker, M. P. (2007). A deficit in the ability to form new human memories without sleep. *Nature Neuroscience, 10*(3), 385–392. doi:10.1038/NN1851

Yu, H., Lu, J., Jia, P., Liu, C., & Cheng, J. (2019). Experimental sleep restriction effect on adult body weight: A meta-analysis. *Sleep and Breathing, 23*(4), 1341–1350. doi:10.1007/s11325-019-01828-0

Yuan, P., & Raz, N. (2014). Prefrontal cortex and executive functions in healthy adults: A meta-analysis of structural neuroimaging studies. *Neuroscience and Biobehavioral Reviews, 42*, 180–192. doi:10.1016/j.neubiorev.2014.02.005

Zhang, L., Shao, Y., Liu, Z., Li, C., Chen, Y., & Zhou, Q. (2019). Decreased information replacement of working memory after sleep deprivation: Evidence from an event-related potential study. *Frontiers in Neuroscience, 13*, 408. doi:10.3389/fnins.2019.00408

Zitting, K. M., Münch, M. Y., Cain, S. W., Wang, W., Wong, A., Ronda, J. M., ... Duffy, J. F. (2018). Young adults are more vulnerable to chronic sleep deficiency and recurrent circadian disruption than older adults. *Scientific Reports, 8*(1), 11052. doi:10.1038/s41598-018-29358-x

Effect of sleep restriction on cognitive function and its underlying mechanism

QIAN Liu[1,2]; Ru Taotao[2,3]; LUO Xue[1]; Niu Jiaxing[1]; Ma Yongjun[1]; ZHOU Guofu[2,3]

([1] *Lab of Lighting and Physio-psychological Health, School of Psychology, South China Normal University, Guangzhou* 510631, *China*)

([2] *National Center for International Research on Green Optoelectronics, South China Normal University, Guangzhou* 510006, *China*)

([3] *Guangdong Provincial Key Laboratory of Optical Information Materials and Technology & Institute of Electronic Paper Displays, South China Academy of Advanced Optoelectronics, South China Normal University, Guangzhou* 510006, *China*)

Abstract: Effects of sleep restriction on cognitive functions have been of considerable concern. Studies showed that effects of sleep restriction on cognitive performance were inconsistent and suggested that effects of sleep restriction on cognition would depend on cognitive domains (e.g. attention, executive function and long-term memory), the severity of sleep restriction, as well as demographic characteristics (e.g. age and gender). Four main possible hypotheses including the arousal hypothesis, the vigilance hypothesis, the controlled attention hypothesis and the prefrontal cortex vulnerability hypothesis have been put forward to explain the underlying mechanism. Further understanding of such mechanism could be facilitated by focusing on individual differences, effects of mild sleep restriction and employing the ASL Perfusion MRI technology.

Key words: sleep restriction; cognitive functions; cognitive domains; individual difference; underlying mechanism